

JURNAL TEKNIK SIPIL

Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil

Karakteristik Dinamik Bola Baja Sebagai Material Isolasi Seismik

Benyamin Bontong

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Tadulako
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu, 94118, E-mail: benbontong@yahoo.com

Harun Mallisa

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Tadulako
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu, 94118, E-mail: harunml@yahoo.com

Tan Suryani Sollar

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Tadulako
Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu, 94118, E-mail: tansuryani@yahoo.com

Abstrak

Sistem isolasi seismik yang tersedia dewasa ini menggunakan teknologi canggih dan umumnya digunakan pada bangunan berlantai banyak. Penelitian ini mengkaji karakteristik isolasi bola baja yang sederhana tetapi diharapkan handal untuk bangunan rumah. Beban bangunan dimodelkan sebagai massa tunggal dan meja getar memodelkan tumpuan dasar (base). Isolasi bola dipasang di antara massa dengan meja getar. Rumah bola dibuat dua macam yaitu berbentuk tabung belah dan $\frac{1}{2}$ bola. Beban siklis diaplikasikan pada meja getar dengan amplitudo 5, 10 dan 20 mm, frekuensi 151 dan 240 cpm. Friksi dalam sistem isolasi diukur. Respons massa dalam gerakan satu arah direkam pada kertas skala. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi percepatan meja getar a_m , semakin besar persentase redaman percepatan yang dirambatkan ke massa. Dalam rentang parameter input yang diaplikasikan, untuk rumah bola berbentuk tabung belah, redaman percepatan mencapai 92% sampai dengan 99 %, sedangkan untuk rumah bola berbentuk $\frac{1}{2}$ bola mencapai 35% sampai dengan 92 %. Rumah bola berbentuk tabung belah jauh lebih efektif meredam percepatan dibandingkan dengan rumah bola berbentuk $\frac{1}{2}$ bola, dengan angka perbandingan respons percepatan massa 1:7 sampai 1:8.

Kata-kata Kunci: Isolasi bola baja, frekuensi, amplitudo, percepatan.

Abstract

Seismic isolation systems being available recently are sophisticated technology and commonly used to reduce multi-storey building response from seismic ground motions. The simple steel ball isolation was conducted to predict the reliability of housing structures in response of seismic ground motion due to earthquake. To develop a model, the building loads are assumed as a single mass system and a vibration table as a supporting base. The steel ball isolation was installed between the mass and the table. Two houses shapes are made, that is, a split cylinder and an half ball. Sinusoidal forces were applied on vibrating table with the amplitudes of 5, 10 and 20 and the frequencies of 151 and 240 cpm. Frictions in the isolation system were measured, while movements of mass responses based on one direction displacement were recorded on scaling papers. This research reveals that the higher the vibrating table acceleration (a_m), the higher the percentage of damping spreads through the mass. In the range of the application of input parameters, the accelerations are reduced from 92% to 99 % for split cylinder ball's house, and from 35% to 92 % for half-ball ball's house. The split cylinder-ball house is much more effective to reduce acceleration than the half-ball house. Those ratios of mass acceleration responses are from one eighth to one seventh.

Keyword: Steel ball isolation, frequency, amplitude, acceleration.

1. Pendahuluan

Telah banyak usaha yang dilakukan untuk mengurangi risiko kerusakan bangunan akibat gempa bumi. Salah satu metode yang sudah dikenal selama ini adalah memasang isolasi antara bangunan atas dan bangunan bawah (pondasi) untuk meredam energi gempa sehingga membatasi beban gempa yang merambat ke bangunan di atasnya. Masalahnya untuk kondisi Indonesia adalah sistem isolasi yang dikenal dewasa ini menggunakan teknologi canggih dan masih sangat terbatas penggunaannya. Sistem isolasi yang ada pada umumnya dipergunakan pada bangunan gedung berlantai banyak. Teknologi tersebut boleh dikatakan praktis belum diterapkan pada bangunan di Indonesia. Di pihak lain jutaan manusia mendambakan untuk mendapatkan perlindungan yang aman terhadap dampak yang ditimbulkan oleh gempa bumi.

Berdasarkan hal tersebut di atas, permasalahan yang masih harus dijawab adalah bagaimana merancang suatu bangunan gedung sehingga benar-benar mampu menahan beban gempa sampai pada taraf yang aman. Penelitian ini mengkaji karakteristik sistem isolasi bola pejal dari baja yang diprediksi dapat diandalkan untuk meredam energi gempa secara signifikan, tetapi dapat diterapkan dengan teknologi yang sederhana pada bangunan rumah.

2. Sistem Kontrol Bangunan Terhadap Gempa

Sistem kontrol respons bangunan terhadap gempa secara garis besar dikenal tiga kategori utama yaitu 1) sistem pengontrolan pasif, 2) sistem pengontrolan semi aktif dan 3) sistem pengontrolan aktif.

Sistem kontrol pasif mereduksi respons bangunan dengan perangkat pasif. Sistem kontrol semi aktif mereduksi respons bangunan dengan cara merubah sifat struktur bangunan seperti redaman (damping) dan kekakuan dengan menggunakan tenaga yang kecil untuk merubah sifat struktur tersebut. Sistem kontrol aktif mereduksi respons bangunan dengan gaya pengontrol yang dihasilkan oleh tenaga yang ekuivalen dengan gaya untuk menahan gaya inersia bangunan. Sistem isolasi tergolong kedalam sistem kontrol pasif.

Saito, et al. (2005) memaparkan beberapa tipe isolasi seismik (sistem kontrol pasif) yang sudah dikenal dewasa ini yaitu *Natural Rubber Bearing*, *High Damping Rubber Bearing*, *Lead Rubber Bearing*, *Elastic Sliding Bearing*, *Curved Plane Sliding Bearing*, *Plane Sliding Bearing*, *Plane Roller Bearing*, *Rail Roller Bearing*. Hasil test menunjukkan bahwa untuk jenis rubber bearing, dapat mengalami simpangan bolak-balik antara ± 100 sampai ± 300 mm, untuk gaya geser 300 sampai 400 kN, jenis sliding

bearing antara ± 100 sampai ± 300 mm untuk gaya geser 20 sampai 160 kN, dan jenis roller bearing, hingga ± 100 mm untuk gaya geser kurang dari 20 kN.

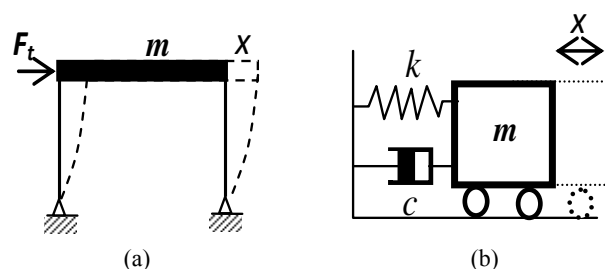
3. Perilaku Isolasi Dasar (*Base Isolation*) pada Bangunan

Beberapa hasil observasi perilaku isolasi dasar yang dilakukan oleh para ahli gempa di Jepang telah dipublikasikan. Hasil observasi tersebut sebagai akibat dari gempa "The Tokachi-Oki Earthquake in 2003" yang melanda kawasan Utara Jepang pada 26 September 2003, Magnitude 8.0 skala JMA, kedalaman focal sekitar 42 km. Hasilnya sebagai berikut: Kajima, et al. (2004) mengobservasi bangunan konstruksi beton tulang berlantai 9 dengan satu lantai *basement* di kota Kushiro. Takenaka, et al. (2004) mengobservasi bangunan kantor dari beton tulang berlantai 3 di kota Kushiro. Sakai, et al. (2004) mengobservasi bangunan rumah sakit dari konstruksi beton tulang berlantai 3. Todo dan Seki (2004) mengobservasi bangunan perbankan beton bertulang berlantai 7 dengan *basement*. Pada masing-masing bangunan tersebut dipasang kombinasi beberapa *rubber bearings*, *lead dampers* dan *steel dampers*. Dari hasil observasi tersebut dicatat nilai tertinggi percepatan maksimum permukaan tanah 280 cm/detik^2 dan *displacement* maksimum pada tumpuan isolasi sekitar 30 cm, terjadi pada bangunan kantor yang diobservasi oleh Takenaka. Nilai reduksi terbesar percepatan terdapat pada hasil observasi Kajima dengan reduksi $>50\%$ percepatan *basement*.

Dari catatan di atas belum dilaporkan penggunaan isolasi pada bangunan rumah tinggal. Narayan C.K., Kumar S.A. and Maharajan S. (2003) mengatakan bahwa sistem rolling termasuk roller silinder dan bola pada umumnya diaplikasikan pada mesin-mesin. Karena sifat bola yang dapat menggelinding dengan bebas ke semua arah, karakteristik ini dapat dimanfaatkan untuk mereduksi beban gempa secara efektif.

4. Pemodelan Sistem Isolasi Seismik

Suatu sistem yang bergetar akibat pengaruh gaya luar, dapat digambarkan dalam bentuk yang diidealisir seperti berikut:



Gambar 1. (a) Struktur diidealisir, (b) Model matematis (Paz, 1996)

Persamaan matematik untuk sistem ini sebagai berikut:

$$F_t = m \cdot a + c \cdot v + k \cdot x \quad (1)$$

dimana F_t = gaya, m = massa, a = percepatan, c = koefisien redaman, v = kecepatan, k = konstanta pegas dan x = perpindahan.

Massa pada penelitian ini tidak disokong oleh kolom pemikul tetapi menyatu dengan dudukannya yaitu rumah bola (**Gambar 2**). Dengan demikian tidak terdapat gaya pemulih (gaya pegas) maupun gaya redaman dalam sistem. Massa mengikuti gerakan dudukannya, sesuai Hukum Newton sebagai berikut:

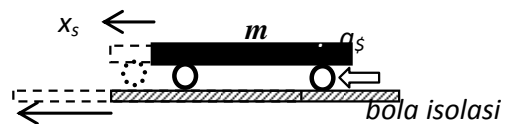
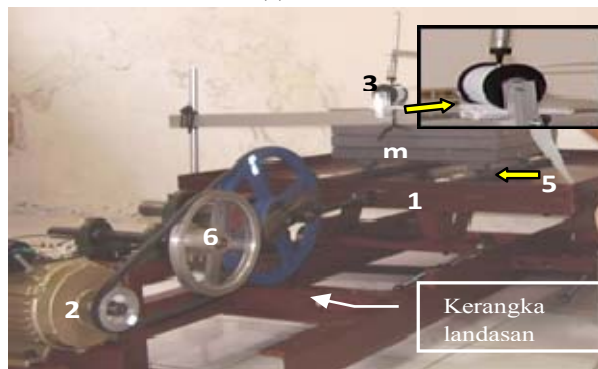
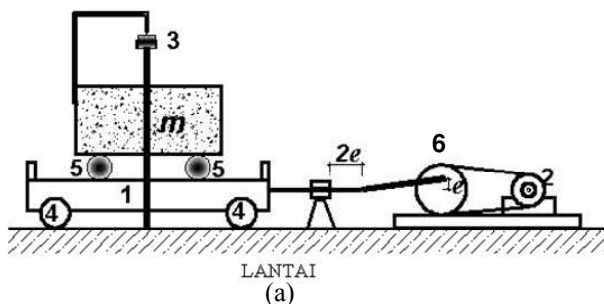
$$F_t = m \cdot a \quad (2)$$

Sasaran perencanaan tahan gempa adalah bagaimana mereduksi gaya inersia ($m \cdot a$) tersebut, salah satunya adalah mereduksi percepatan massa dengan memasang sistem isolasi. Sistem isolasi dengan tumpuan gelinding di modelkan seperti **Gambar 2**.

Jika tidak ada friksi dalam sistem (kontak antara massa, bola dan meja getar licin sempurna), massa akan tetap diam ditempatnya sewaktu meja bergetar (energi getaran secara teoritis diredam 100%). Jadi gaya penggerak massa hanyalah akibat friksi tersebut, yang akan diukur pada penelitian ini. Sasaran yang ingin dicapai adalah rasio a_s/a_m yang rendah.

5. Cara Pengujian

5.1 Peralatan uji

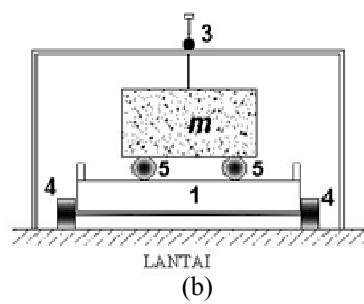


Gambar 2. Model isolasi tumpuan gelinding. a_s dan a_m adalah percepatan massa dan meja getar. x_s dan x_m perpindahannya (Bontong, et al., 2009).

Meja getar mensimulasikan gerakan siklis permukaan (gerakan maju-mundur), digerakkan oleh motor AC 220 V *single phase*, 1400 cpm (*cycles per minute*). Frekuensi diukur dengan tachometer digital: DEKO TC 2234 L, kapasitas 5 s/d. 99.999 cpm ketelitian 0,05%.

Massa model dibuat dari beton berukuran 40x40x3,5 cm dengan massa 12,5 kg, sebanyak 6 buah. Dudukan massa dari pelat besi ukuran 40x40 cm, pada keempat sudutnya dipasang rumah bola. Rumah bola dibuat dua variasi yaitu berbentuk 1/2 bola dan berbentuk silinder belah. Untuk mengarahkan gerakan massa dalam satu arah, digunakan rel yang dipasang di atas meja getar, sejajar dengan arah gerakan meja getar.

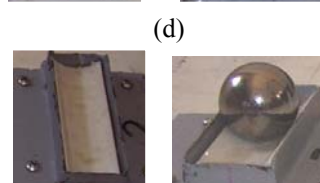
Gerakan massa relatif terhadap lantai direkam pada kertas skala milimeter yang dirakit pada sepasang kaki penahan yang berdiri bebas di atas lantai (Lihat **Gambar 3**). Hasil rekaman menampilkan kurva perpindahan massa terhadap waktu. Lamanya waktu perekaman dicatat dengan menggunakan stop watch. Friksi dalam sistem isolasi diukur dengan proving ring terkalibrasi.



Keterangan gambar:

1. Meja getar
2. Unit motor penggerak
3. Pencatat perpindahan massa (ball point dan kertas skala dalam gulungan rol)
4. Roda meja getar
5. bola isolator, sekaligus pendukung massa, diameter 1 1/8 inci (28,58 mm)
6. Puli pengatur frekuensi

m = massa model didukung oleh 4 bola baja.
 E = eksentrisitas poros pemutar (amplitudo meja = e), nilai e divariasikan.



Gambar 3. Alat uji model. (a) Skets tampak samping, (b) Skets tampak depan, (c) Foto alat (d) rumah bola berbentuk 1/2 bola, (e) Rumah bola berbentuk tabung (silinder) belah (Bontong, et al., 2009)

5.2 Rancangan parameter input

Massa dibuat 4 variasi yaitu 12.5 kg, 25 kg, 50 kg dan 75 kg. Frekuensi getaran meja dibuat dua variasi yaitu 151 cpm (15.8 rad/s) dan 240 cpm (25.2 rad/s). Amplitudo gerakan maju mundur meja getar dibuat 3 variasi berturut-turut 5, 10 dan 20 mm.

5.3 Parameter output

Rekaman pada kertas skala menampilkan kurva respons perpindahan massa vs waktu. Frekuensi getaran massa didapat dengan menghitung jumlah siklus yang terekam dibagi dengan lamanya waktu perekaman.

5.4 Prediksi dengan program simulink

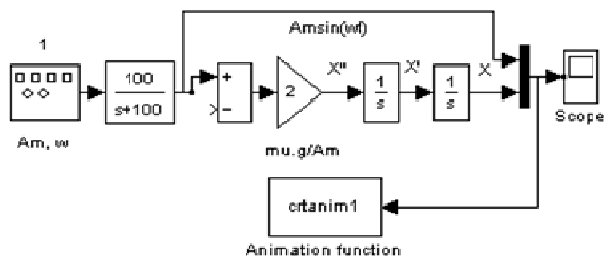
Getaran massa dapat diprediksi dengan program simulink yang ada pada Matlab. Dari Persamaan (2), dapat ditulis persamaan respons gerakan massa untuk beban friksi harmonik :

$$mx_s'' = f_r \sin w.t = \mu N \sin w.t \quad (3)$$

dimana f_r = gaya friksi, μ = koefisien friksi system dan N = gaya normal. Persamaan ini dapat ditulis dalam bentuk:

$$A_m \sin w.t (\mu g / A_m) = x_s'' \quad (4)$$

Dimana A_m = amplitudo meja getar. Diagram blok simulink untuk solusi Persamaan (4) sebagai berikut:



Gambar 4. Diagram blok simulink (Matlab Version 6.5 Release 13)

A_m dan w diinput pada signal generator (blok 1); $\mu g / A_m$ dimasukkan pada Gain (blok 2). Output program simulink menampilkan kurva perpindahan massa vs waktu.

6. Analisis Data dan Pembahasan

6.1 Friksi dalam sistem

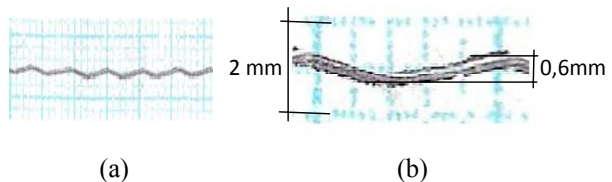
Tabel 1. Hasil pengukuran friksi

Massa (kg)	Gaya friksi (N)	
	Rumah bola silinder belah	Rumah bola 1/2 bola
12.5	1.15	13.7
25	2.19	25.4
50	4.54	44.8
75	6.73	65.6
Tangen sudut friksi	0.009	0.083

Sumber: Bontong, et al., 2009

6.2 Hasil pengukuran dan analisis respons massa

Rekaman respons massa diperlihatkan penggalan contohnya pada Gambar 5. Dari rekaman tersebut jumlah siklus selama waktu pengamatan dihitung. Amplitudo dibaca pada kurva berdasarkan skala gambar. Untuk contoh ini, amplitudo = $\frac{1}{2}$ dari 0,6 mm = 0,3 mm (simpangan maksimum terhadap garis netral).



Gambar 5. Menentukan amplitudo (a) Contoh rekaman perpindahan terhadap waktu. (b). Menentukan amplitudo berdasarkan skala gambar (Bontong, et al., 2009)

Dimisalkan percepatan meja getar a_m dan percepatan massa a_s , amplitudo meja getar A_m dan amplitudo massa A_s . Hasilnya sebagai berikut:

Tabel 2. Respons untuk rumah bola berbentuk silinder belah pada frekuensi meja getar ± 151 cpm (± 15.8 rad/s)

Massa (kg)	Meja getar A_m (mm)	Meja getar w (rad/s)	Respons massa A_s (mm)	Respons massa w (rad/s)	Percepatan a_m gals	Percepatan a_s gals	Ratio a_s/a_m %	Reduksi Percepatan %
12.5	5	15.79	0.4	15.83	125	10.0	8.0%	92.0%
	10	15.84	0.4	15.86	251	10.0	4.0%	96.0%
	20	15.84	0.5	15.89	502	12.6	2.5%	97.5%
25	5	15.89	0.4	15.94	126	10.2	8.1%	91.9%
	10	15.84	0.4	15.84	251	10.0	4.0%	96.0%
	20	15.81	0.5	15.94	500	12.7	2.5%	97.5%
50	5	15.87	0.4	15.70	126	9.9	7.8%	92.2%
	10	15.84	0.4	15.90	251	10.1	4.0%	96.0%
	20	15.77	0.5	15.88	497	12.6	2.5%	97.5%
75	5	15.95	0.4	15.95	127	10.2	8.0%	92.0%
	10	15.89	0.4	15.89	252	10.1	4.0%	96.0%
	20	15.77	0.4	15.83	497	10.0	2.0%	98.0%

Tabel 3. Respons untuk rumah bola berbentuk silinder belah pada frekuensi meja getar +240 cpm (+ 25.2 rad/s)

Massa (kg)	Meja getar A_m (mm)	Meja getar w (rad/s)	Respons massa A_s (mm)	Respons massa w (rad/s)	Percepatan a_m gals	Percepatan a_s gals	Ratio a_s/a_m %	Reduksi Percepatan %
12.5	5	25.19	0.2	25.18	317	12.7	4.0%	96.0%
	10	25.15	0.2	25.24	633	12.7	2.0%	98.0%
	20	25.19	0.2	25.24	1269	12.7	1.0%	99.0%
25	5	25.17	0.2	25.14	317	12.6	4.0%	96.0%
	10	25.19	0.2	25.14	634	12.6	2.0%	98.0%
	20	25.19	0.2	25.23	1269	12.7	1.0%	99.0%
50	5	25.17	0.2	25.19	317	12.7	4.0%	96.0%
	10	25.16	0.2	25.16	633	12.7	2.0%	98.0%
	20	25.15	0.2	25.36	1265	12.9	1.0%	99.0%
75	5	25.21	0.2	25.24	318	12.7	4.0%	96.0%
	10	25.16	0.3	25.07	633	15.7	2.5%	97.5%
	20	25.20	0.3	25.26	1270	19.1	1.5%	98.5%

Sumber: Bontong, et al., 2009

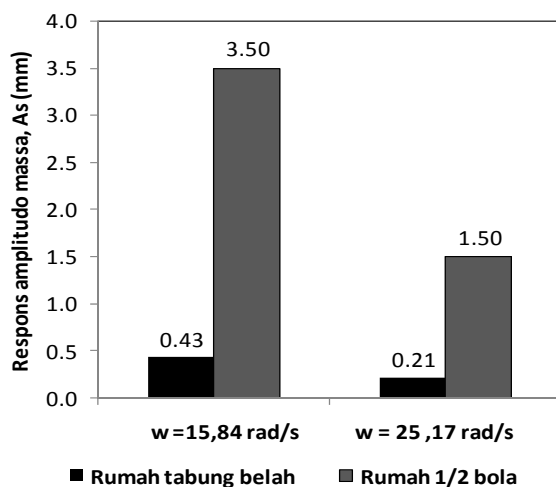
Tabel 4. Respons untuk rumah bola berbentuk ½ bola pada frekuensi meja getar+ 151 cpm (+ 15.8 rad/s)

Massa (kg)	Meja getar		Respons massa		Percepatan		Ratio	Reduksi Percepatan
	A_m (mm)	w (rad/s)	A_s (mm)	w (rad/s)	a_m gals	a_s gals	a_m/a_s %	
12.5	5	15.85	3.5	15.94	126	88.9	70.7%	29.3%
	10	15.79	4.0	15.77	249	99.4	39.9%	60.1%
	20	15.83	3.0	15.80	501	74.9	14.9%	85.1%
25	5	15.84	3.0	15.84	126	75.3	60.0%	40.0%
	10	15.79	4.0	15.87	249	100.7	40.4%	59.6%
	20	15.81	3.5	15.89	500	88.4	17.7%	82.3%
50	5	15.85	3.0	15.88	126	75.6	60.2%	39.8%
	10	15.87	3.5	15.80	252	87.4	34.7%	65.3%
	20	15.83	4.0	15.87	501	100.8	20.1%	79.9%
75	5	15.85	3.5	15.87	126	88.1	70.1%	29.9%
	10	15.85	3.5	15.82	251	87.6	34.9%	65.1%
	20	15.81	3.5	15.83	500	87.7	17.5%	82.5%

Tabel 5. Respons untuk rumah bola berbentuk ½ bola pada frekuensi meja getar +240 cpm (+ 25.2 rad/s)

Massa (kg)	Meja getar		Respons massa		Percepatan		Ratio	Reduksi Percepatan
	A_m (mm)	w (rad/s)	A_s (mm)	w (rad/s)	a_m gals	a_s gals	a_s/a_m %	
12.5	5	25.14	1.5	25.16	316	95.0	30.0%	70.0%
	10	25.16	1.5	25.13	633	94.7	15.0%	85.0%
	20	25.16	1.5	25.19	1266	95.2	7.5%	92.5%
25	5	25.20	1.5	25.16	317	94.9	29.9%	70.1%
	10	25.13	1.5	25.13	632	94.7	15.0%	85.0%
	20	25.15	1.5	25.20	1265	95.2	7.5%	92.5%
50	5	25.15	1.5	25.22	316	95.4	30.2%	69.8%
	10	25.19	1.5	25.17	634	95.1	15.0%	85.0%
	20	25.13	1.5	25.17	1263	95.0	7.5%	92.5%
75	5	25.19	1.5	25.20	317	95.2	30.0%	70.0%
	10	25.17	1.5	25.13	634	94.7	15.0%	85.0%
	20	25.14	1.5	25.17	1264	95.0	7.5%	92.5%

Sumber: Bontong, et al., 2009

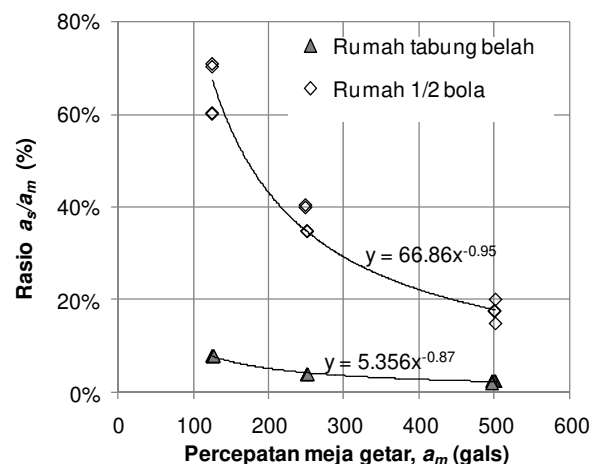


Gambar 5. Hubungan antara frekuensi, bentuk rumah bola dengan respons amplitudo massa (Bontong, et al., 2009)

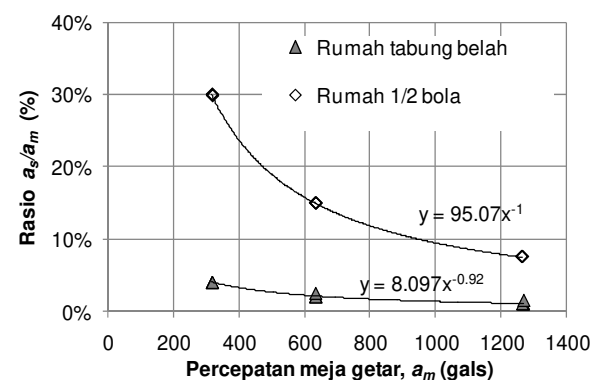
6.3 Pembahasan hasil

Tabel 2 sampai Tabel 5 menunjukkan bahwa untuk setiap tipe rumah bola dan frekuensi meja getar, dengan perlakuan variasi amplitudo meja getar 5, 10 dan 20 mm dan variasi massa 12,5, 25, 50 dan 75 kg, menimbulkan respons amplitudo massa A_s pada nilai yang dapat dikatakan konstan. Dengan kata lain respons amplitudo massa tidak dipengaruhi oleh perubahan amplitudo meja getar maupun perubahan besarnya massa, tetapi dipengaruhi oleh tipe rumah bola dan frekuensi meja getar. Demikian pula respons frekuensi massa ω_s konstan dan sama dengan frekuensi meja getar ω_m . ($\omega_s = \omega_m = \omega$).

Gambar 6 menunjukkan bahwa semakin tinggi frekuensi getaran ω , semakin rendah respons amplitudo massa A_s untuk masing-masing tipe rumah bola. Nilai A_s untuk rumah bola berbentuk silinder belah jauh lebih kecil dibandingkan dengan rumah bola berbentuk ½ bola, dengan rasio 1:8 untuk frekuensi 15,84 rad/s dan 1:7 untuk frekuensi 25,17 rad/s. Hal ini seirama dengan ratio gaya friksi antara kedua tipe rumah bola sebesar rata-rata 1:10.8



Gambar 6. Hubungan antara percepatan meja getar dengan rasio a_s/a_m untuk frekuensi rata-rata 15,8 Rad/s (Bontong, et al., 2009)



Gambar 7. Hubungan antara percepatan meja getar dengan rasio a_s/a_m untuk frekuensi rata-rata 25.2 Rad/s (Bontong, et al., 2009)

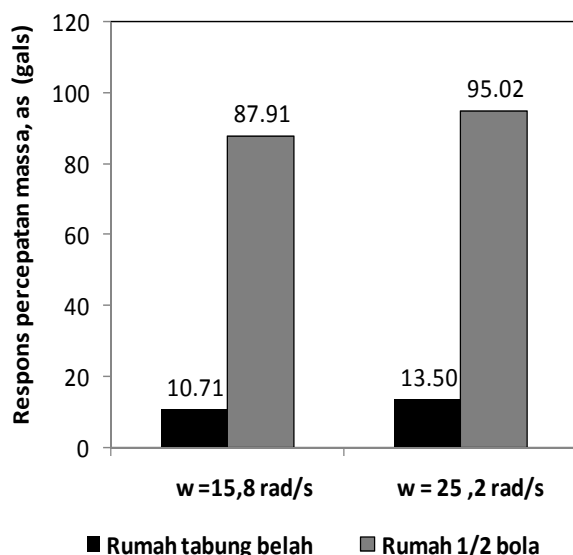
Pada **Gambar 7** dan **8**, parameter y adalah rasio percepatan massa dengan percepatan meja getar ($y = a_s/a_m$). Nilai $y = 1$ bila tidak ada isolasi, dan bernilai nol bila sistem isolasi dapat meredam 100% pengaruh getaran meja. Semakin besar percepatan meja getar semakin kecil y , yang berarti semakin besar reduksi percepatan meja yang diteruskan ke massa, (semakin efektif kinerja isolasi). *Trend* hubungan tersebut didekati dengan persamaan pangkat:

$$y = p \cdot x^q \quad \text{dimana } p \text{ dan } q \text{ adalah konstanta.}$$

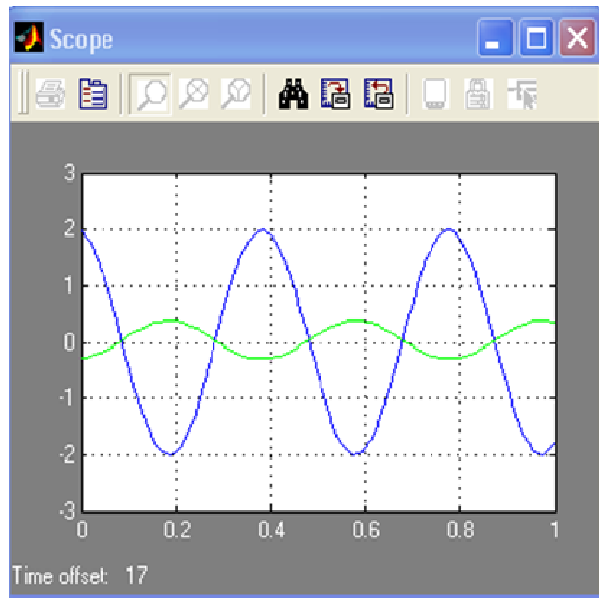
Pada **Tabel 2** dan **3** (rumah silinder belah) dapat dilihat bahwa percepatan meja dapat diredam sebesar 92% sampai 99% sedangkan untuk rumah bola berbentuk $\frac{1}{2}$ bola (**Tabel 4** dan **5**) dapat diredam sekitar 30% sampai 92 %.

Tabel 2 sampai dengan **Tabel 5** di atas, menunjukkan bahwa respons percepatan massa a_s boleh dikatakan tidak tergantung kepada amplitudo A_m maupun percepatan meja getar a_m , tetapi tergantung kepada ω . Nilai rata-rata a_s diperlihatkan pada **Gambar 9**, dimana rumah bola berbentuk silinder belah menghasilkan respons percepatan massa jauh lebih kecil dibandingkan dengan rumah bola berbentuk $\frac{1}{2}$ bola, dengan perbandingan 1 : 8,2 pada frekuensi $\omega = 15,8 \text{ rad/s}$, dan 1:7 untuk frekuensi $\omega = 25,2 \text{ rad/s}$. (**Gambar 9**)

Respons Massa yang diprediksi dengan Program Simulink berdasarkan gaya friksi dalam system (lihat **Tabel 1**), salah satu hasilnya diperlihatkan pada **Gambar 10**.



Gambar 8. Hubungan antara frekuensi ω dengan respon rata-rata percepatan massa a_s (Bontong, et al., 2009)



Gambar 9. Simulasi respons amplitudo massa A_s vs waktu pada frekuensi 15,8 rad/s, A_m 2 cm, rumah bola berbentuk $\frac{1}{2}$ bola (Bontong, et al., 2009)

Perbandingan antara respons amplitudo massa rata-rata hasil pengujian dengan hasil simulasi program Simulink (diambil beberapa contoh) pada tabel berikut:

Tabel 6. Respons amplitudo massa hasil pengujian dan hasil simulasi untuk Rumah $\frac{1}{2}$ Bola

Gaya Friksi (N)	ω (rad/s)	Amplitudo Meja Getar, A_m (mm)	Respons Amplitudo Massa, A_s (mm)	
			Rataan hasil uji	Simulasi Matlab
65.5	15.80	20	3.5	3.5
65.5	15.80	5	3.3	3.5
65.5	25.20	20	1.5	1.5

Sumber: Bontong, et al., 2009

Tabel 7. Respons amplitudo massa hasil pengujian dan hasil simulasi untuk rumah berbentuk silinder belah

Gaya Friksi (N)	ω (rad/s)	Amplitudo Meja Getar, A_m (mm)	Respons Amplitudo Massa, A_s (mm)	
			Rataan hasil uji	Simulasi Matlab
6.7	15.80	5	0.43	0.4
6.7	25.20	5	0.21	0.2

Sumber: Bontong, et al., 2009

Pada Tabel 6 dan 7 dapat dilihat bahwa respons amplitudo massa hasil pengujian maupun hasil prediksi simulasi program Simulink menunjukkan nilai yang secara praktis dapat dikatakan sama. Dengan demikian hasil yang didapatkan untuk rentang parameter yang digunakan dalam pengukuran dipandang cukup akurat.

6.4 Diskusi

Bola isolator dalam rumah berbentuk $\frac{1}{2}$ bola ternyata tidak berotasi dalam rumahnya saat digeser, tetapi bergeser (bertranslasi) di atas permukaan. Hal ini disebabkan luas bidang kontak antara permukaan bola isolator dengan permukaan rumah $\frac{1}{2}$ bola jauh lebih besar dibandingkan dengan luas bidang kontak antara bola isolator dengan lantai. Jadi hambatan friksi untuk berotasi dalam rumah $\frac{1}{2}$ bola lebih besar daripada hambatan friksi untuk bergeser di atas lantai. Untuk rumah $\frac{1}{2}$ bola, sifat bola yang bebas menggelinding ke semua arah tidak dapat dimanfaatkan karena ternyata hanya bergeser di atas permukaan (berfungsi sebagai slider saja).

Bola isolator dalam rumah berbentuk silinder belah bebas menggelinding baik terhadap rumah bola maupun di atas lantai. Hal ini mengakibatkan rumah bola berbentuk silinder belah jauh lebih efektif meredam pengaruh getaran dibandingkan dengan yang berbentuk $\frac{1}{2}$ bola.

7. Kesimpulan

1. Respons amplitudo massa A_s pada setiap frekuensi ω dan tipe rumah bola secara praktis dapat dikatakan konstan dalam rentang variasi amplitudo meja getar A_m dari 5 sampai dengan 20 mm dan massa m dari 12,5 sampai dengan 75 kg.
2. Semakin tinggi frekuensi ω semakin tinggi pula respons percepatan massa a_s , tetapi sebaliknya semakin rendah respons amplitudo massa A_s .
3. Semakin tinggi percepatan meja getar a_m , semakin besar persentase redaman percepatan yang diteruskan ke massa. Dalam rentang parameter input yang diaplikasikan, untuk rumah bola berbentuk tabung belah, redaman percepatan mulai dari 92% (pada a_m terendah) sampai dengan 99 % (a_m tertinggi), sedangkan untuk rumah bola berbentuk $\frac{1}{2}$ bola, mulai dari 35% (pada a_m terendah) sampai dengan 92 % (a_m tertinggi).
4. Rumah bola berbentuk silinder belah jauh lebih efektif meredam pengaruh getaran dibandingkan dengan rumah bola berbentuk $\frac{1}{2}$ bola. Hal ini sangat nyata pada perbandingan respons percepatan massa a_s yaitu untuk frekuensi $\omega = 15.8$ rad/s, perbandingannya adalah 1:8 dan pada $\omega = 25.2$ rad/s, 1:7.

7.1 Saran

1. Penelitian pada tahun pertama ini difokuskan pada respons dinamik isolasi bola dalam gerakan satu arah. Penelitian perlu dilanjutkan untuk mengamati respons sistem dalam kedua arah salib sumbu sistem massa model.
2. Bola isolasi bergerak bebas dalam rumah bola dan memiliki kesetimbangan netral di atas permukaan mendarat sehingga posisi bola pasca getaran mudah bergeser dari posisi semula. Untuk mengembalikan ke posisi semula, direncanakan memasang pegas pengembali yang perlu diteliti kinerjanya.
3. Untuk mengetahui kekuatan tekan bola yang berfungsi ganda sebagai isolator dan sekaligus pendukung massa, perlu dilakukan uji tekan pada beberapa variasi diameter bola.

Ucapan Terima Kasih

Tim peneliti mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan Nasional, yang telah mendanai penelitian ini, berdasarkan kontrak Nomor: 2237/H28/PL/2009, Tanggal 25 April 2009, dan pihak-pihak lain yang membantu terselenggaranya penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Bontong, B., Mallisa, H., Solli, T.S., 2009, "Sistem Isolasi Seismik Menggunakan Tumpuan Bola Baja pada Dasar untuk Meredam Energi Gempa", Laporan Penelitian Fundamental, Lemlit Untad Palu.
- Saito, T., et al., 2005, "Response Control and Seismic Isolation of Buildings". London: SPON Press.
- Kajima, T., Ito, A. and Fujita, H., 2004, "Earthquake record of 2003 Off Kushiro Earthquake at Kushiro-Government Office", *Mensin Journal*, No.43, pp. 36-38.
- Narayan C.K., Kumar S.A. and Maharajan S., 2003, "Earthquake Resistant Design Using Tyres as Dampers", Department of Civil Engineering Bharath Institute of Science and Technology, 173, Agaram Road, Selaiyur, Chennai-600 073.
- Paz, Mario, 1996, "Dinamika Struktur, Teori dan Perhitungan", Erlangga.
- Sakai, S., Ito, Y., and Iida, T., 2004, "Earthquake Response of Base Isolation Hospital", *Mensin Journal*, No.43, pp. 41-43

- Takenaka, Y., Yasuda, T. and Suzuki, Y. 2004, "Earthquake observation of base isolation building in Kushiro city at 2003 Off Kushiro Earthquake", *Mensin Journal*, No.43, pp. 31-35
- Todo, M. and Seki, H. 2004 "Earthquake record of 2003 Off Kushiro Earthquake at Kushiro-bank headquarter", *Mensin Journal*, No.43, pp. 39-40